

# 大容量PC鋼より線の曲げ配置部における フレッティング疲労特性

新井英雄<sup>1</sup>・藤田学<sup>2</sup>・梅津健司<sup>3</sup>・鮎子多浩一<sup>4</sup>・上田多門<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 住友建設(株)PC設計部次長(〒160-8577 東京都新宿区荒木町13-4)

<sup>2</sup>正会員 工修 住友建設(株)技術研究所主任研究員(〒329-0432 栃木県河内郡南河内町仁良川1726)

<sup>3</sup>正会員 住友建設(株)技術研究所研究員(〒329-0432 栃木県河内郡南河内町仁良川1726)

<sup>4</sup>工修 住友電気工業(株)特殊線事業部PC部主査(〒107-8468 東京都港区元赤坂1-3-12)

<sup>5</sup>正会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

プレストレストコンクリート橋の外ケーブルを対象として、曲げ配置半径を小さく設定したPC鋼より線S15.2について、フレッティングに着目した疲労試験を行った。PC鋼より線相互の点接触による高支圧かつ相対滑りを伴うフレッティングにより、破断箇所はPC鋼より線の外側素線に集中しており、破断起点にはフレッティング痕と亀裂が確認された。そのときのPC鋼より線の疲労寿命はフレッティングが無視される通常の疲労寿命に比べて短く、曲げ配置半径が小さなPC鋼より線の疲労設計においては、フレッティングの影響を無視できないことが明らかとなった。本研究では試験結果からフレッティングを考慮した設計疲労強度式を提案するとともに、フレッティング疲労を抑制するためには充填グラウトを拘束する構造が有効であることを示した。

**Key Words :** *fretting fatigue, prestressing strands, external tendon, deviator, extradosed bridge*

## 1. はじめに

プレストレストコンクリート橋の主桁コンクリートにプレストレスを与えるための緊張材の配置方式には、桁部材の内部に配置する内ケーブル方式と、外部に配置する外ケーブル方式がある。外ケーブル方式では、緊張材を偏向させ、その配置形状を保持させる部位であるデビエータやサドルの寸法の縮小を図るために、緊張材の曲げ配置半径を一般に内ケーブル方式の曲げ半径の2分の1から3分の1に小さく設定する。

緊張材の曲げ配置半径を小さくした条件下では、フレッティングによる疲労強度の低下が懸念される。フレッティング(fretting)とは、微小振幅の相対運動を受ける接触2面間に生じる摩耗現象である<sup>1)</sup>。PC鋼より線のフレッティング疲労の概念を図-1に示す。PC鋼より線を束ねて緊張材とした場合、デビエータでは鋼材が複数段に重なり、外側の鋼材から内側の鋼材へ偏向による腹圧力が作用する。その場合、鋼より線相互は点接触するので、接触部では腹圧力による応力が集中している。その状況にあって鋼材に軸方向応力変動が生じ、それに伴う微小な相対滑りがPC鋼より線あるいは素線間に生

じると、接触箇所に摩耗及び亀裂が発生する。さらに進行すると破断に至る。この一連の現象がフレッティング疲労である。

PC鋼より線のフレッティング疲労特性に関する研究は、外国に数例あるのみで国内ではまだ少ないので、筆者らはその破断性状や疲労寿命を究明するために疲労試験を行った。実施した試験体の種類は、要素試験として裸のPC鋼より線S15.2を2本重ねたものと、実橋で用いられる外ケーブルを想定した大容量である19S15.2とした。19S15.2を用いた試験体の偏向部構造は、桁側面に設けるデビエータを模型化したタイプと、エクストラドーズドPC橋の主塔サドルを模型化したタイプとした。

それらの結果の一部は既報<sup>2), 3)</sup>で報告しているが、その後応力振幅が異なる試験体について疲労試験を実施し、S-N線を得るためのデータを蓄積した。またエポキシ樹脂により被覆したPC鋼材や、グラウト非充填の試験体についても疲労試験を行った。

本稿では、それらの結果を包括して得られた知見を報告すると共に、大容量PC鋼より線の曲げ半径を小さく設定した条件下におけるフレッティング疲労を考慮した設計疲労強度式を提案する。

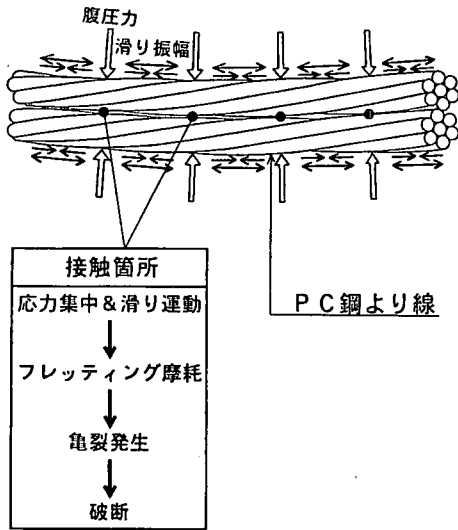


図-1 PC鋼より線のフレットング疲労の概念

表-1 PC鋼より線の化学成分と機械的性質

品名	JIS G 3502 ピアノ線材 SWRS82B					
化学成分	C	Si	Mn	P	S	Cu
%	0.82	0.21	0.68	0.0144	0.014	0.051
規格値	-	-	-	≤0.025	≤0.025	≤0.20
機械的性質	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )		引張応力 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	
	1710		1880	6.9	194100	
規格値	≥1570		≥1860	3.5	-	

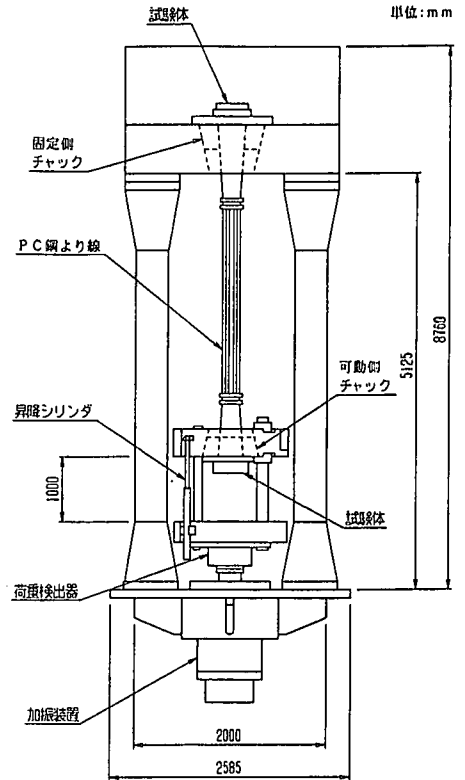


図-2 引張疲労試験装置図

## 2. 2S15.2による要素試験

### (1) 試験の概要

PC鋼より線のフレットング疲労性能に影響を及ぼす要因は、応力振幅、永久応力、相対滑り、腹圧力、被覆材の種類、保護管の材質、グラウト充填の有無等が考えられる。これらは輻輳して作用するので、個々の要因を抽出して論ずるためには、条件を変えた多種の疲労試験を実施する必要があるものと考えられる。本章ではPC鋼より線のフレットング疲労の基本特性を得るために、2本の裸のPC鋼より線S15.2(SWPR7B)を接触させて応力振幅を与えた疲労試験を行った。試験に供した鋼材S15.2とは、素線7本により構成される公称径15.2mmのより線であり、断面積は試験成績書より140.7mm<sup>2</sup>である。PC鋼より線の化学成分と機械的性質を表-1に示す。

試験装置を図-2に、試験体の定着部及び偏向部の詳細を図-3に示す。デビエータにおけるPC鋼より線の偏向角は0.5°、曲げ配置半径は3.0mとした。PC鋼より線にグラウトは施していない。定着部は左右対称にPC鋼より線を2本ずつ配置した。

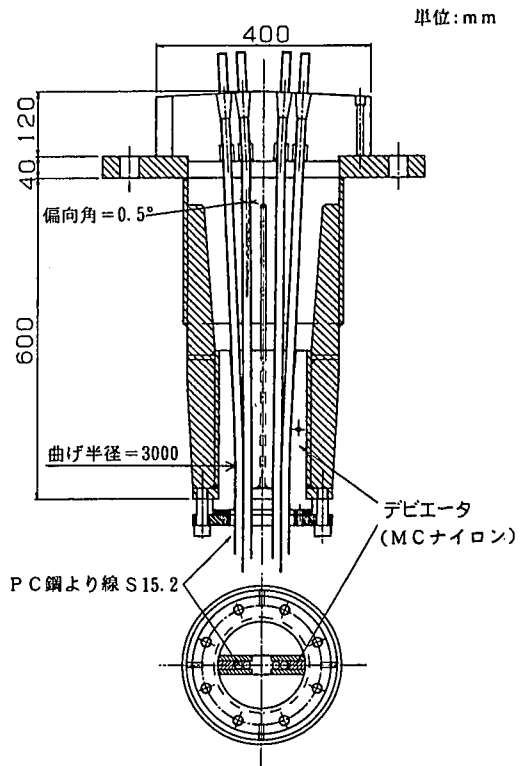


図-3 定着部及び偏向部の詳細図

表-2 各試験体の疲労試験の条件及び結果

試験体 No.	PC鋼より線の被覆	応力振幅 N/mm <sup>2</sup>	破断時 繰返し載荷回数	破断した PC鋼より線
B-1	無	100	360,000	可動側, 外側
B-2	無	50	1,177,000	固定側, 内側
B-3	無	30	1,108,000	固定側, 内側
B-4	無	20	4,000,000	可動側, 外側
B-5	無	20	7,740,000	可動側, 外側
B-6	エポキシ樹脂	50	300万回で破断せず	-

表-3 2S15.2の初破断に関する回帰線

y 軸切片 $\alpha$	勾配 k	相関係数 r
4.827	0.525	0.92

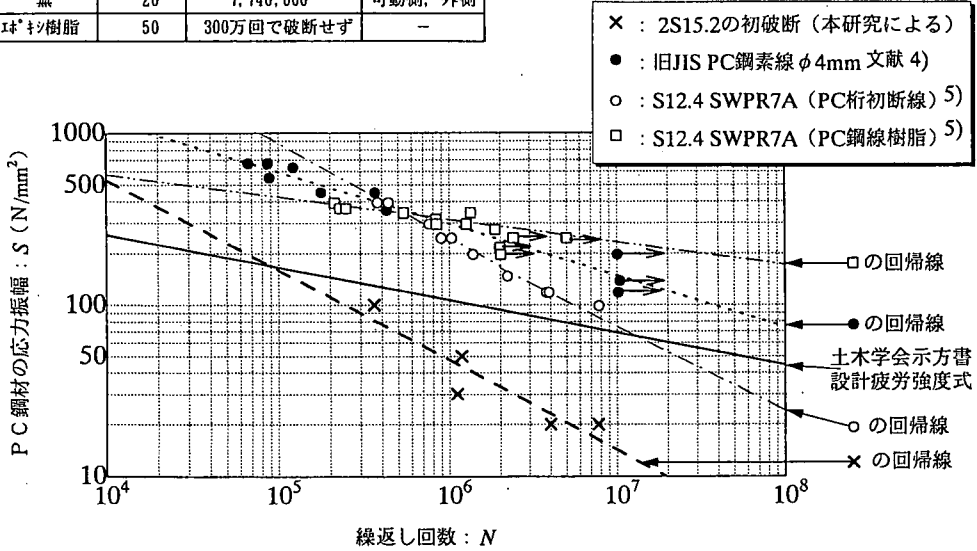


図-4 PC鋼より線の疲労試験によるS-N線図

表-4 既往試験によるPC鋼線の疲労強度の回帰式

	旧JIS PC鋼素線 $\phi 4\text{mm}$ 文献 4)		S12.4 SWPR7A 文献 5)			
	$\alpha$	k	PC桁初断線		PC鋼線樹脂	
$N \leq 2 \times 10^6$	4.280	0.301	5.680	0.548	3.284	0.131
$N > 2 \times 10^6$	-	-	5.316	0.492	-	-
凡例	●		○		□	

$\alpha$  : y軸切片 (ただし, 単位をN/mm<sup>2</sup>にした場合), k : 勾配

疲労試験は、図-2の下側のチャックに上下振幅を与えることにより、試験体であるPC鋼より線に応力振幅を与える機構とし、デビエータにおけるPC鋼より線の重なり部においてフレットングが生じる環境にして行った。実橋の供用時におけるPC鋼材の引張応力度は、一般に引張強度 ( $f_{pud}$ )の50%~60%であるので、本疲労試験では、試験体鋼材の下限応力はそれらの不利な条件側である $0.6f_{pud}$  (=1120N/mm<sup>2</sup>)に統一した。また応力振幅をパラメータ(100, 50, 30, 20N/mm<sup>2</sup>)とした。

本試験は、先に挙げたフレットング疲労の要因のうち、永久応力(下限応力)、腹圧力と相関のある曲げ配置半径、保護管の材質(MCナイロン)、グラウト充填の有無の条件(グラウト無し)は、いずれの試験体も同一とし、応力振幅とそれに伴う相対滑りが試験体毎に異

なるものである。ただし試験体B-6のみは、エポキシ樹脂塗装PC鋼より線である(表-2参照)。なお、いずれの試験体も載荷振動数は4.0Hzとした。

(2) 試験結果

試験は、左右対称に配置した4本のPC鋼より線の内、いずれか1本が破断した時点で繰返し載荷を中断した。各試験の破断時繰返し載荷回数を表-2に示す。

得られた結果を以下に記す。

①破断は全て、偏向部におけるPC鋼より線相互の接触部で発生した。表-2の「破断したPC鋼より線」の欄に示した「内側」「外側」は、2本重ねたものの、デビエータと接するPC鋼より線を内側、そのPC鋼より線と反対側で接するPC鋼より線を外側と称している。破断

の起点は、P C鋼より線の外周であり、フレットング痕及びフレットングコロージョンによる酸化摩耗粉（赤錆）が見られた。よってP C鋼より線相互のフレットングが原因で破断に至ったと判断される。

②試験に供した未破断のP C鋼より線について、引張試験を行ったところ、全て健全な母材と同等の引張荷重（強度）を発揮して絞り破断したので、これらにはフレットングによる亀裂は入っていないことを確認した。

③試験体B-6（エポキシ樹脂塗装P C鋼より線）に与えた繰返し載荷回数は、300万回であったが、その繰返し載荷中、破断は生じなかった。疲労試験後に解体してP C鋼より線の接触面を見ると、エポキシ樹脂塗装も健全な状態であった。同じ応力振幅を与えて実施した通常の裸鋼より線の試験体B-2の破断寿命が1,177,000回であったことを考慮すると、エポキシ樹脂塗装P C鋼より線は耐フレットング疲労性能が優れていると考えられる。

### (3) S-N線図

2S15.2の要素試験で得られた疲労破断寿命を図-4にプロットした。log Sのlog Nに対する1次回帰式は式(1)で表せられ、その回帰直線を図-4に示す。

$$S = \frac{10^\alpha}{N^k} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

ここに、S：P C鋼材の応力振幅（疲労強度）(N/mm<sup>2</sup>)  
 N：繰返し載荷回数（疲労寿命）  
 α：S-N線図におけるy軸切片  
 k：S-N線の勾配

回帰式のy軸切片、勾配、相関係数を表-3に示す。

図-4には、P C鋼線の疲労に関する既往の研究による疲労試験結果も示す。図-4における●は、関らが行った旧JIS P C鋼より線S12.4Bの素線φ4mmの単体について、平均応力度を1110N/mm<sup>2</sup>とした試験による疲労破断寿命である<sup>4)</sup>。

○及び□は、後藤、猪熊が行ったP C鋼より線S12.4SWPR7Aの下限応力度を引張強度の60% (1030N/mm<sup>2</sup>)としたときの疲労試験結果である<sup>5)</sup>。○は、P R C桁に配置したP C鋼より線を想定したもので、P C単純桁に緊張配置したS12.4に関する素線の初破断寿命を示したものである。□はS12.4単体について、ウェッジでの破断を防ぐために、エポキシ樹脂と圧着グリップを併用した定着具を用い、P C鋼より線の母材部で疲労破断するようにして行った空気中疲労試験の、7本の素線中の初破断寿命を示したものである。

これら既往の試験結果に関して、回帰式(1)におけるα、kを表-4に示す。筆者らの実施したP C鋼より線の

フレットング疲労試験結果における勾配k=0.525は、●(k=0.301)や□(k=0.131)より大きく、○(k=0.548)に近いものであった。

土木学会コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>におけるP C鋼線及びP C鋼より線に関する設計疲労強度式として、式(2)が示されている。

$$f_{prd} = 280 \frac{10^{ar}}{N^k} \left(1 - \frac{\sigma_{pp}}{f_{pud}}\right) / \gamma_s \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

ここに、f<sub>prd</sub>：P C鋼材の設計疲労強度

N：疲労寿命

σ<sub>pp</sub>：永久荷重によるP C鋼材の応力度

f<sub>pud</sub>：P C鋼材の設計引張強度

ar及びk：ar=1.14, k=0.19

γ<sub>s</sub>：P C鋼材の材料係数で、一般に1.05としてよい。

上記学会式は、P C鋼線及び鋼より線について比較的最近わが国で行われた豊福ら<sup>7)</sup>、後藤ら<sup>5)</sup>、小林ら<sup>8)</sup>の疲労試験結果に基づき、試験値が下回る確率を5%として得られた式（特性値）に材料係数γ<sub>s</sub>を考慮したものである<sup>9)</sup>。ただし、式は最小応力（σ<sub>pp</sub>）の影響を修正グッドマン線図により考慮して作成されている。それらの疲労試験体は、空气中またはコンクリート部材内、3%食塩水中において、直線配置で行われたものである。図-4に式(2)にσ<sub>pp</sub>=0.6 f<sub>pud</sub>を代入した場合の式による線を示す。

筆者らの実施したフレットングに着目して行った疲労試験結果は、この学会疲労強度式の線を下回っており、P C鋼より線においてフレットング疲労が生じると疲労強度が低下することが分かる。

## 3. 大容量P C鋼より線の疲労試験

### (1) 試験の概要

#### a) 試験装置及び試験体

試験装置を図-5に示す。アクチュエータ直下に取り付けたコンクリートブロックは、箱桁内のデビエータを模型にしたものである。デビエータブロック内における外ケーブル配置形状は、中央に直線配置部（長さ1m）、その両側に円弧配置部（曲げ半径3m）を設けた。曲げ半径3mは、外ケーブル19S15の実橋偏向部において一般的に用いられているものである<sup>10)</sup>。また実橋の箱桁内部における外ケーブルの偏向角は一般的に3°~10°であることを考慮し、円弧配置部一ヶ所当たりの偏向角はその中間の7°とした。

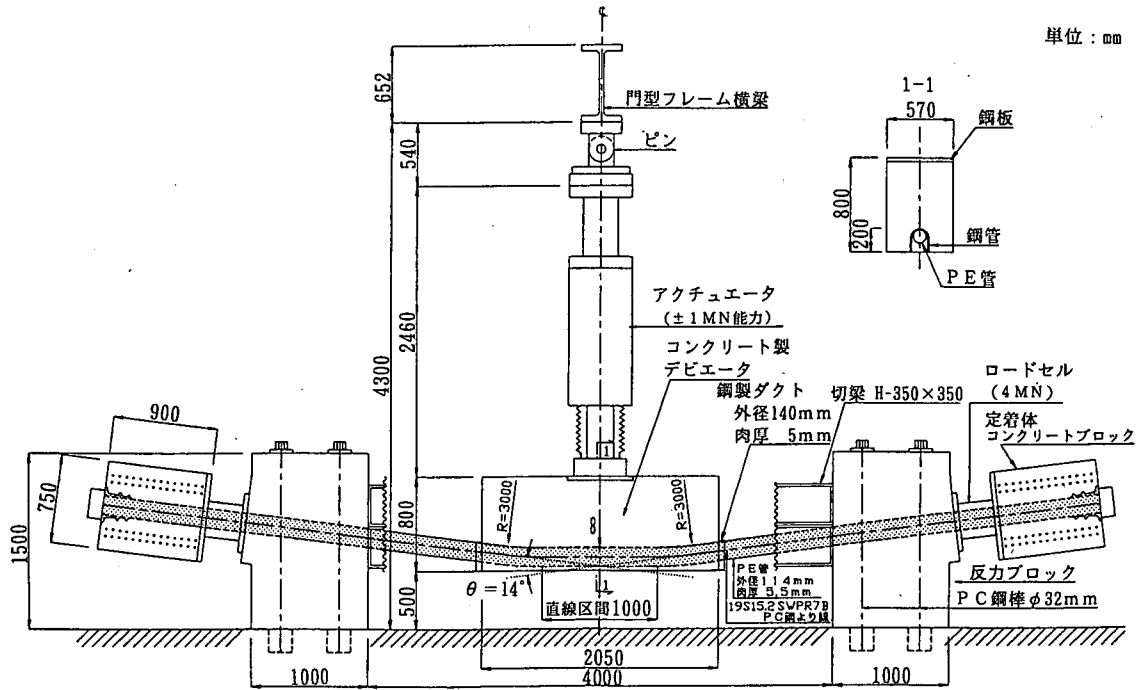


図-5 試験装置図

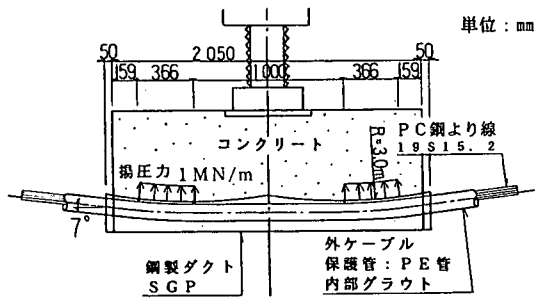


図-6 デビエータの構成

試験体ケーブルは、PC橋に用いられる大容量外ケーブルの実物大モデルとし、下記の構成のものを用いた。  
鋼材：PC鋼より線19S15.2 SWPR7B

19S15.2とは、S15.2を19本束ねたものである。  
断面積=2673.3mm<sup>2</sup>（試験成績書より）

19S15.2の全素線数は、133本（=7×19）である。  
保護管：高密度PE（ポリエチレン）管（外径114mm、肉厚5.5mm）を用いた試験体と鋼管（SGP、外径114mm、肉厚4.5mm）を用いた試験体の2種類とした。

保護管内：グラウト（普通ポルトランドセメント、水セメント比=45%、混和剤：メラミン系ノンブリージングタイプ）を充填した試験体を標準とした。

試験装置の偏向部では、鋼製ダクトと、PC鋼材の保護管が接触している。その構成を図-6に示す。鋼製ダクト端部はケーブルの折れを防ぐために、曲げ越している。

試験体ケーブルは、片引きにより引張強度の60%を緊張導入した。ケーブル引張力は、緊張側と固定側の定着体と反力ブロックの間にロードセルを設けて測定した。それによる緊張側、固定側の引張力を $P_1$ 、 $P_2$ としたとき、角変化1ラジアン当たりの摩擦係数 $\mu$ は、式(3)<sup>11)</sup>によって表せられる。

$$\mu = \frac{\ln \frac{P_1}{P_2}}{\alpha} \quad (3)$$

ここに、 $\alpha$ ：ケーブルの角変化（=0.2443ラジアン）

式(3)に測定値 $P_1$ 、 $P_2$ を代入し、各試験体の $\mu$ を算定すると0.15～0.19/ラジアン範囲にあった。ただし $P_1$ 、 $P_2$ は、緊張作業中はこのように摩擦損失分の差があったが、導入直後は定着時のプルインによりほぼ左右均等とすることができた。

緊張定着後、セメントグラウトを、片側の定着具から反対側の定着具に排出されるまで注入することにより、試験体保護管内に充填した。グラウトは約一週間養生し、20N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度発現後、疲労試験（繰返し載荷）を開始した。

表-5 繰返し载荷条件

試験体 No.	保護管 の材質	グラウト 充填の 有無	P C 鋼材応力(N/mm <sup>2</sup> )			フレット 鉛直変位 全振幅 δ (mm)	振動数 n (Hz)	振動速度 v ※1 (mm/秒)
			全振幅 σ <sub>r</sub>	下限 σ <sub>min</sub>	上限 σ <sub>max</sub>			
M-1	PE	有	120	1120	1240	20.0	0.40	25
M-2	PE	有	80	1120	1200	12.6	0.54	21
M-3	PE	有	50	1120	1170	8.8	0.70	19
M-4	PE	有	20	1120	1140	3.8	1.80	21
M-5	PE	無	50	1120	1170	8.7	0.70	19
M-6	鋼	有	50	1120	1170	8.3	0.70	18

※1)  $v = \delta \times \pi \times n$

b) 载荷条件

疲労試験は、アクチュエータによりデビエータブロックに鉛直方向の一定変位振幅を与えることにより、ケーブル試験体に軸方向ひずみ変動を生じさせて応力振幅を与える機構とした。この载荷方法は、J.E.Breen らの行ったフレッシング疲労試験の方法と同様である<sup>12)</sup>。

実橋における外ケーブルは、偏向部の長さより自由長（空中における直線配置部の長さ）が全長に占める割合が大きいこと、及び曲げ剛性より軸剛性が卓越する部材であることにより、活荷重による自由長部の軸方向のひずみ変動は、ケーブル断面内で一様である。デビエータ内に円弧配置部を2ヶ所設けることにより総偏向角を14°とした本疲労試験では、試験体ケーブルの定着具間隔（8600mm）に対し、ケーブルに所定の応力振幅を生じさせるためのデビエータの鉛直振幅が4~20mmと小さくて済むことにより、実橋外ケーブルのその挙動は再現されている。

また本疲労試験では、振幅サイクルにおいて、デビエータ内の円弧配置部とその外側の直線配置部の境界に、外ケーブルの配置形状が円弧から直線に変化する部分が存在し、そこでは曲げ疲労の影響が加わる。実橋の外ケーブルも桁に対して可動であることにより、疲労荷重下でデビエータ内で滑り、配置形状が円弧から直線に変化する部分が存在する。これより本試験のその挙動は、実橋の挙動から乖離したものではない。

なおP C 鋼より線の破断が進行しても、P C 鋼より線の応力振幅はほぼ設定値を維持するように、アクチュエータは変位制御とした。

試験体の载荷条件を表-5に示す。M-1~M-5は、デビエータにおける外ケーブルを想定した試験体である。保護管は、高密度PE管を用いた。そのうちM-1~M-4は、応力振幅をパラメータとした。M-5は、フレッシング疲労性状に及ぼすグラウトの影響を把握するために、保護管内部にグラウトを充填しない試験体とした。

M-6は、エクストラドーズドP C 橋の主塔のサドルを想定した試験体である。主塔のサドルにおいて採用されている構造の一例を図-7に示す<sup>13)</sup>。斜ケーブルの主塔出入口に位置するソケットでは、内面にテーパーを付け、

斜ケーブルの左右張力差等による引抜き力に抵抗する構造としている。この構造は、内部に充填したグラウトを拘束し、ひいてはP C 鋼より線のフレッシングを抑制するという副次的効果が期待されるので、この効果を検証することを目的とした試験体である。

M-6の保護管は鋼管（SGP）で、管端部内側にテーパーを付け、端面にポリエチレンスペーサを密着配置することにより、保護管内のグラウトを密閉し拘束する構造とした（図-8参照）。ここにスペーサは、保護管にボルト留めする鋼製キャップを外側に被せることにより、保護管と一体化させている。

いずれの試験体も疲労試験における鋼材の下限応力度は、引張強度の60%である1120N/mm<sup>2</sup>に統一した。

振動数は、アクチュエータによる振幅中央における鉛直方向载荷速度が、表-5に示すように各試験体で18~25mm/秒と互いに近くなるよう設定している。

c) 試験による確認項目

① P C 鋼材の疲労寿命

疲労寿命を、全素線数の2%が破断したときとするもの（アメリカのPTI 規準における斜張ケーブルを対象にした試験規準<sup>14)</sup>）と5%が破断したときとした試験<sup>12)</sup>の実績がある。本試験では、初破断（素線が初めて破断したとき）と2%破断（3本の素線が破断したとき）と5%破断（7本の素線が破断したとき）を確認した。

② 疲労試験後のP C 鋼より線の機械的性能

疲労試験後、解体して取り出したP C 鋼より線について、静的引張試験を行い、所定の機械的性能（強度、伸び）を満足しているかを確認した。これにより、フレッシングに起因する亀裂の入ったP C 鋼より線を判別した。

d) 計測システム

計測項目と使用機器の対応を表-6に示す。

疲労試験では、試験中に生じる材料破断を精度よく感知できることが重要である。本試験ではP C 鋼より線の素線破断の感知は、破断時に生じる振動を加速度計で、張力変化をロードセルで動的に計測することによって行った。そのシステムを図-9に示すが、試験体ケーブルに取り付けた加速度計からトリガー機能を備えた波形サン

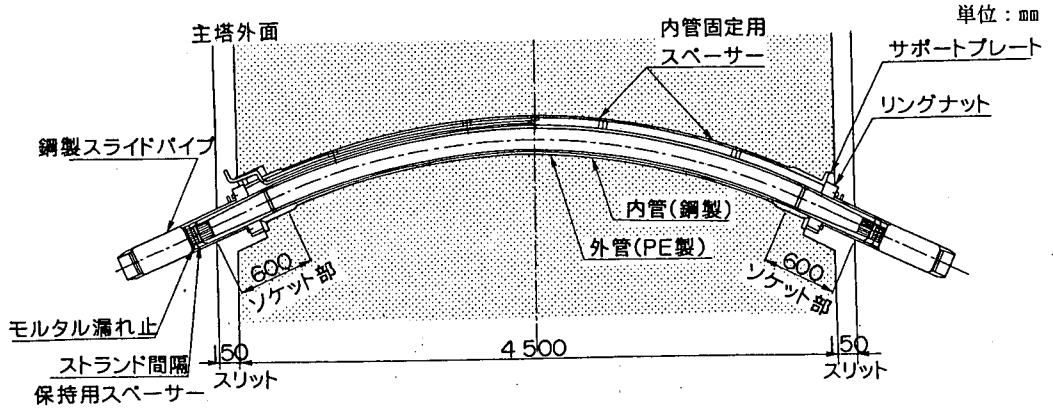


図-7 主塔のサドル構造の例

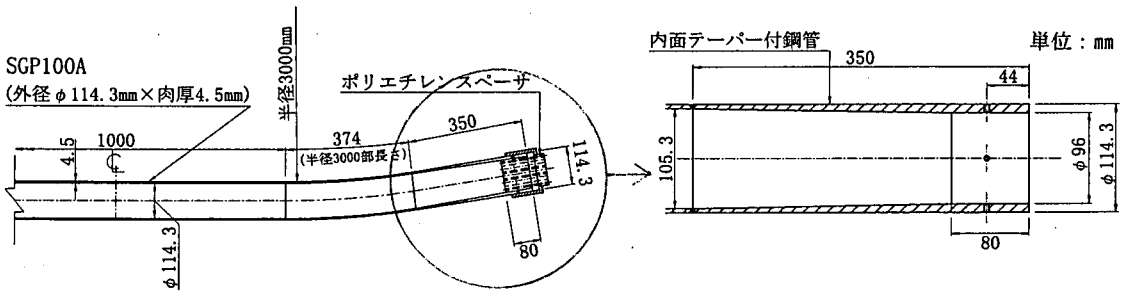


図-8 M-6の端部テーパ付鋼製保護管の構造

表-6 計測項目と使用機器

計測項目	使用機器
ケーブル引張力	定着体と反力ブロック間に配置したロードセル, P C 鋼より線に貼り付けたひずみゲージ
ケーブル鉛直分力	アクチュエータ
デビエータ鉛直変位	アクチュエータ, ダイアルゲージ
素線の破断	加速度計 (± 5 G), ロードセル

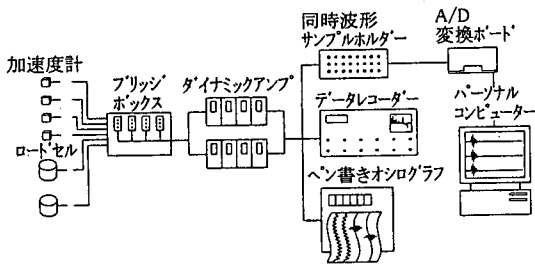


図-9 破断感知システム

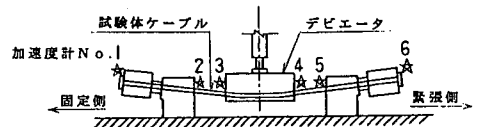
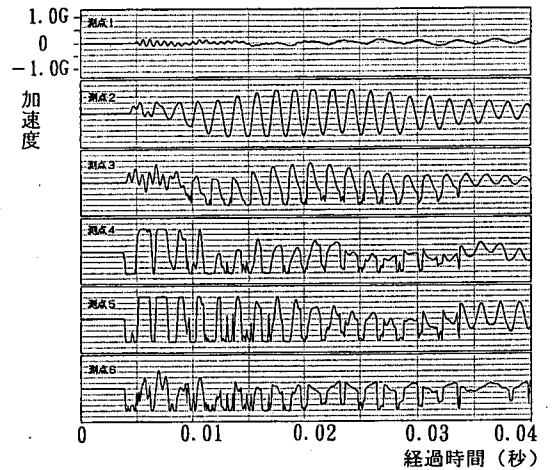


図-10 加速度計感知波形例

表-7 疲労試験の結果

試験体 No.	応力振幅 $\sigma_r$ (N/mm <sup>2</sup> )	繰返し载荷回数			繰返し载荷 停止時回数	疲労試験 期間 (日)	疲労試験中 デビエータ部 破断箇所数
		初破断 (素線 1 本目)	2%破断 (素線 3 本目)	5%破断 (素線 7 本目)			
M-1	120	259,000	281,000	351,000	385,000	12	22
M-2	80	786,000	817,000	880,000	980,000	21	13
M-3	50	1,157,000	1,227,000	2,027,000	3,000,000	50	13
M-4	20	破断せず	破断せず	破断せず	10,000,000	65	0
M-5	50	691,000	709,000	841,000	1,112,000	19	13
M-6	50	破断せず	破断せず	破断せず	3,000,000	50	0

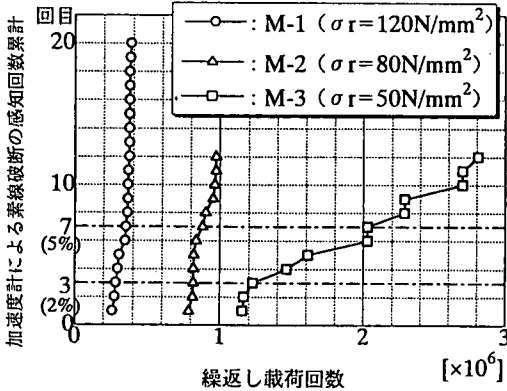


図-11 繰返し载荷に伴う素線の破断発生の推移

プリングホールド装置とパソコンを接続したシステムは、本試験のために開発したものである。

素線が破断すると試験体の6ヶ所に取り付けた加速度計には、破断箇所に近い順に衝撃波形が届く。加速度計感知波形の一例を示した図-10では、デビエータの緊張側円弧部の近くに取り付けた加速度計No. 4が波の立ち上がりが最も早く、かつ初めの加速度も大きい。よってこの場合、加速度計No. 4の近傍で素線が破断したと推定される。疲労試験中は、このように加速度計6ヶ所の同時波形を比較することにより破断箇所を推定した。推定結果は位置、数とも試験終了後の解体調査結果と整合しており、本システムによる破断感知は精度よく行えたことが確認された。

(2) 試験結果

各試験体の疲労試験の結果を表-7に示す。繰返し回数値は、1000回未滿を切り捨てて表記した。

a) 破断発生の推移

繰返し载荷回数に対応する加速度計による素線の破断感知回数累計を図-11に示す。これより応力振幅が大きい試験体ほど、繰返し载荷回数における破断の発生間隔が短い性状が認められる。即ち大容量PC鋼より線において、応力振幅が大きい場合はフレット疲労によ

る破断は同時発生的な傾向があり、応力振幅の小さな場合は一部の素線が破断してから他の素線が破断するまで、やや余寿命がある。

b) 破断性状

疲労試験後、試験体を解体し調査を行った。破断はPC鋼より線を構成する素線単位で生じていた。デビエータでの素線破断箇所の分布を図-12に示す。円弧部の「固定端側」「緊張端側」とは、PC鋼より線を試験装置に据え付けたときにおける、緊張力を片引き導入した方向を表す。

ケーブル断面におけるPC鋼より線の配置状況を調査するための切断位置は、デビエータ内の直線配置部中央とした。円弧部で切断しなかったこと理由は、人為的な切断とフレット疲労による破断の区別がつかなくなることを防止するためである。切断面描写を図-12に示す。断面図において相互に接触していないPC鋼より線が見られるが、これは直線配置部の切断面であるため、円弧部では層状に重なって接触していると考えられる。

PC鋼より線の破断箇所を写真-1、素線の破断面を写真-2、フレット痕を写真-3に示す。写真-3は、フレット痕の表面にフレットコロージョンによる酸化摩耗粉(錆)が生じているものである。図-1に上下に隣接するPC鋼より線の概念図を示したが、その接触面ではより方向が交差するため、点接触する。これより写真-3のように、フレット痕は、PC鋼より線の軸方向における素線の間隔(35mm)に等しい間隔で現れる。

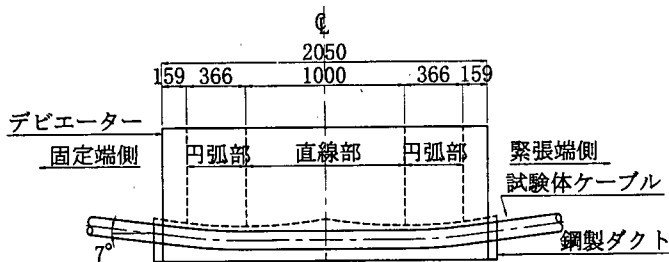
表-8に、破断した全素線の性状を示す。素線の破断面は、図-13に示すように断面に占める亀裂の割合に応じて2つの形状に便宜上分類した。破断の起点は、図-14に示すようにPC鋼より線の外側と内側に分類した。

観察された性状は以下である。

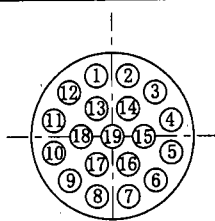
①他の鋼材との接触部であったことを示すフレット痕の、端部または中程に亀裂の起点があり、素線軸方向に対しほぼ直角方向に亀裂が進展している(写真-2参照)。続いて素線軸に対し斜め方向に破面が生じ、破断に至ったと推察される。



側面図



定着端でのPC鋼より線の番号

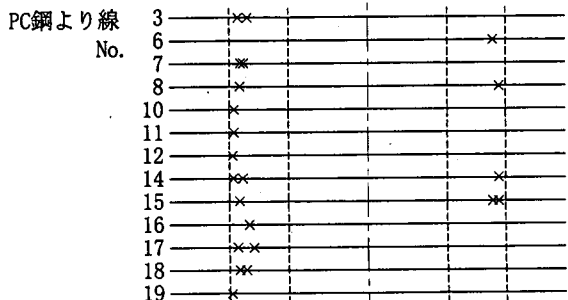


デビエーター内直線部におけるケーブル断面

× : 素線の破断箇所

破断素線を●で示す

試験体 M-1

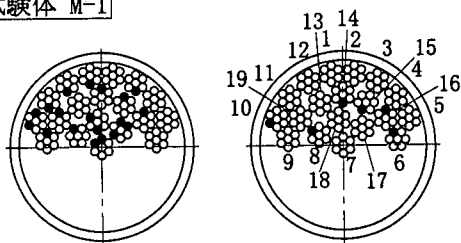


破断箇所 : (固定端側)17+(緊張端側)5=22ヶ所

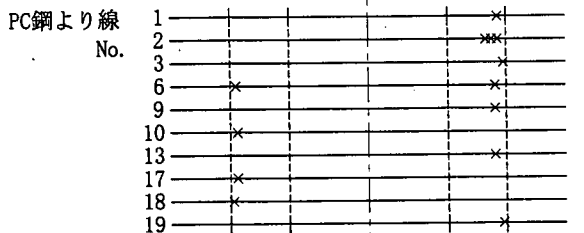
固定端側

緊張端側

試験体 M-1

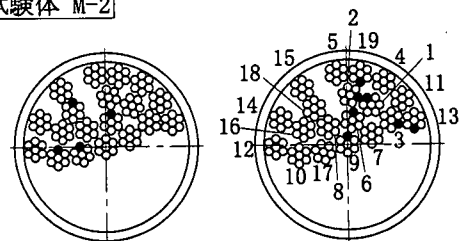


試験体 M-2

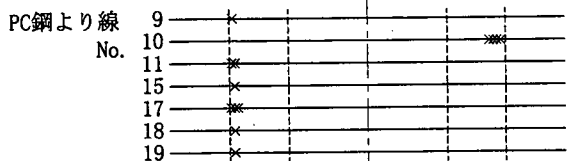


4+ 9=13ヶ所

試験体 M-2

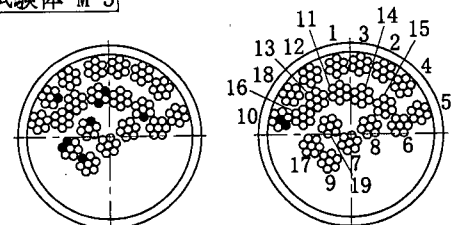


試験体 M-3

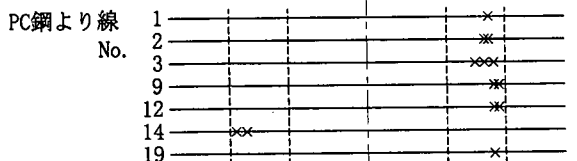


9+ 4=13ヶ所

試験体 M-3



試験体 M-5



2+ 11=13ヶ所

試験体 M-5

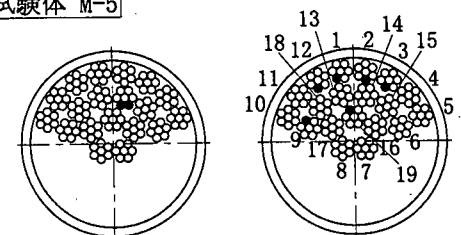


図-12 PC鋼より線の素線の破断箇所

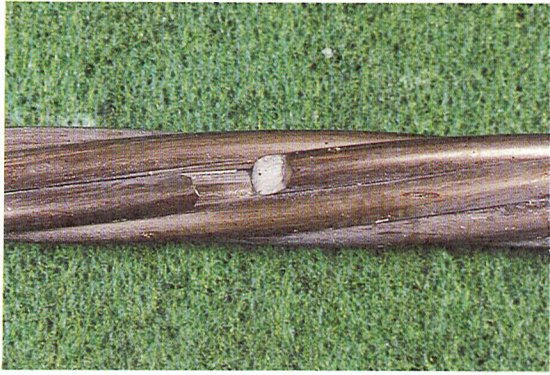


写真-1 PC鋼より線の破断箇所

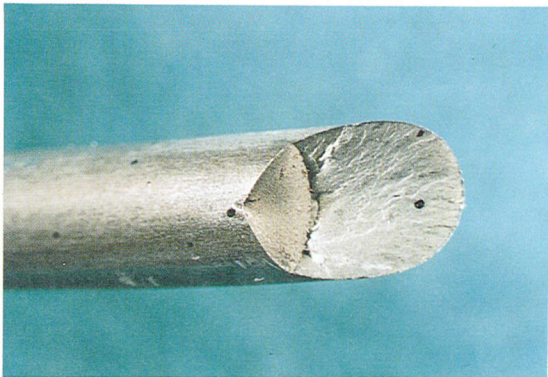


写真-2 素線の破断面

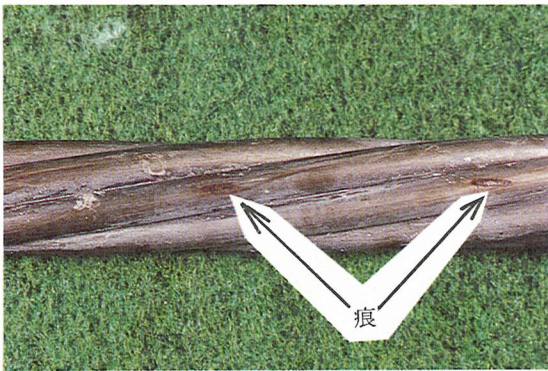


写真-3 フレッシング痕

表-8 素線破断面の性状

試験体 No.	円弧部	PC鋼より線 No.	破断位置 (mm) ※1	破断面の形状	破断の起点	フレッシングの有无	
M-1 破断 22ヶ所	固定側 17ヶ所	3	760	A	外側	有り	
			810				
		7	770				
			770				
			8				810
			10				840
			11				830
			12				845
			14				790
			825				
			15				800
			16				745
			17				720
			820				
			18				770
			800				
			19				850
			緊張側 5ヶ所				6
	8	810					
	14	815					
	15	780					
	815						
M-2 13ヶ所	固定側 4ヶ所	6	820	B	外側	有り	
		10	805				
		17	820	A			
		18	835				
	緊張側 9ヶ所	1	800	B			
		2	735				
		775					
		810					
		3	850				
		6	790				A
		9	775				B
		13	780				A
		19	860				
M-3 13ヶ所	固定側 9ヶ所	9	850	A	外側	有り	
		11	850				
		855	B				
		15	825	A			
		17	830	B			
		860	A	内側			有(特多)
		865					
	18	830	B				
	19	825					
	緊張側 4ヶ所	10	780	A	外側	有り	
		810					
		845					
		790	B				内側
830		B					
767		A					
M-5 13ヶ所	固定側 2ヶ所	14	830	B	外周	無し	
		767	A	有り			
	緊張側 11ヶ所	1	745	B		無し	
		2	730			有り	
		750	無し				
		3	692			無し	
		732	有り				
		770	A			無し	
		9	780			B	有り
		810	B			無し	
		12	780			A	有り
		805					
		760					

※1) 破断位置は、デビエータ中心からの距離である。

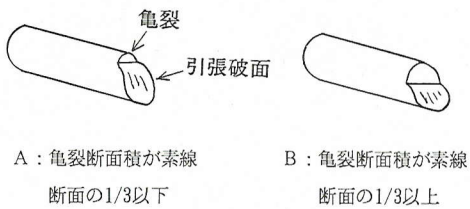


図-13 疲労破面の分類

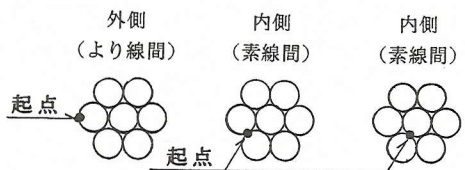


図-14 破断起点



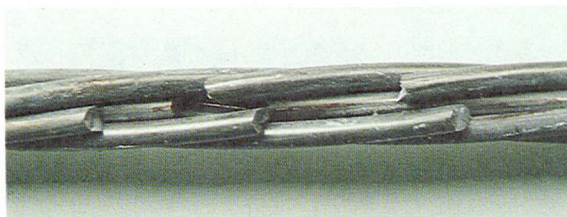


写真-4 中芯素線の破断したPC鋼より線

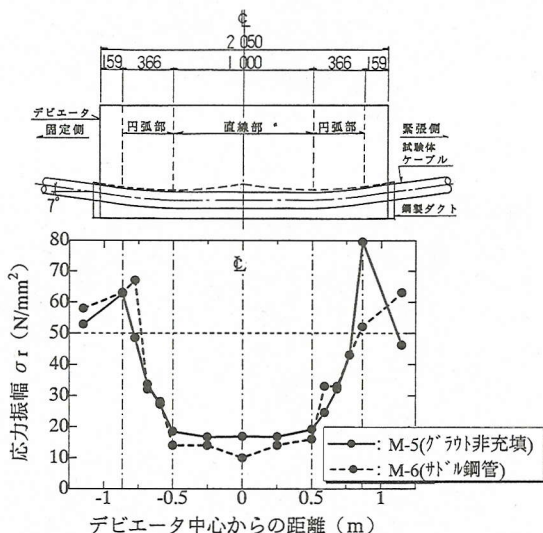


図-15 PC鋼より線の応力振幅分布

フレッシング疲労の破壊機構について概説した武藤の論文<sup>15)</sup>では、亀裂の発生位置を次のように説明している。亀裂は一般に接触部の端部近傍に発生するが、亀裂が接触部中央で生じるのは、激しいフレッシング摩擦が全接触領域に渡り、接線力が集中部のない均一な分布をしている場合である。

これを筆者らの試験結果に当てはめれば、フレッシング痕の中程にある亀裂の起点は、相対滑りが大きいことにより、激しいフレッシング摩擦が全接触領域に生じた箇所におけるものと推察される。

②PC鋼より線の破断起点は、ほとんど外側であったが、一部内側でも見られた。外側に起点があるのは、PC鋼より線相互のフレッシングによって亀裂が入ったもの、内側に起点があるのは、PC鋼より線内の素線相互のフレッシングによって亀裂が入ったものである。試験体M-1、M-2では、全ての破断起点は外側であった。試験体M-3では全破断箇所14ヶ所の内、2ヶ所が内側に破断起点があった。

PC鋼より線の曲げ配置部において、PC鋼より線相互は点接触であるのに対し、素線相互はマクロ的には線接触である。これにより接触面積の小さいPC鋼より線

相互の方が、素線相互より接触部の単位面積当たりの腹圧応力度が大きく、フレッシングの環境が苛酷であるので、疲労寿命は短いと推察される。

内側に破断起点が見られたPC鋼より線は、M-3のNo. 10、17であった(表-8参照)。これらはいずれも一本のPC鋼より線の中の複数素線が、No. 10では65mm、No. 17では35mmの短区間で近接して破断したものである。そのうち中芯素線の破断したNo. 10の破断箇所を写真-4に示す。観察したところ、PC鋼より線相互のフレッシングによる素線の破断が先に生じ、その破断面に他の未破断素線が点接触した箇所フレッシングが生じて破断した可能性が高い。よってこれは素線相互の線接触が原因のフレッシング疲労破断ではないと推察される。M-3は、繰返し載荷回数が300万回と多かったため、このような誘発された破断が生じたと考えられる。

③試験体M-1、M-2、M-3、M-5の素線の外観調査では、破断に至らなかった鋼より線の素線についても、フレッシング疲労によると推察される亀裂が入ったものが散見された。

#### c) 破断箇所の分布に関する考察

デビエータにおける素線破断は、図-12に示すように円弧端付近に集中した。この原因として次の3つの要因が考えられる。

①応力振幅：試験体M-5、M-6で計測したデビエータ部PC鋼より線の応力振幅を図-15に示す。これは円弧配置部における19S15.2の最外層のPC鋼より線にゲージを貼付し、計測したものである。この図より分かるようにケーブルの自由長部で50N/mm<sup>2</sup>の応力振幅が、円弧部の摩擦により中央直線部では10~20N/mm<sup>2</sup>まで減少している。即ちフレッシング疲労の要因である応力振幅は、円弧部では自由長側に近いほど大きい。

なお、円弧端において応力振幅が60~80N/mm<sup>2</sup>と大きく生じているのは、配置形状が直線から円弧に変化することによる曲げの影響が生じているものである。

②相対滑り：配置形状が直線と曲線によって構成されている束ねたPC鋼より線を用いた外ケーブルでは、円弧の内側を通過する延長と外側を通過する延長が僅かに異なるため、軸方向に一樣伸びを生じた場合、内側のPC鋼より線と外側のPC鋼より線のひずみは異なるものとなる。これによりPC鋼より線相互に、微小な相対滑りが生じる。

図-16に、配置区間の摩擦(例えば、ケーブルと鋼製ダクト、またはPC鋼より線相互の摩擦)を無視した場合の応力振幅が120N/mm<sup>2</sup>のときの試験体軸方向における内外に隣り合うPC鋼より線の相対滑り量の分布を示す。円弧部では端部に行くほど相対滑り量が大きく、円弧端でフレッシング疲労が発生し易いことが分かる。

③配置形状の変化：ケーブル試験体の自由長部の仰角の

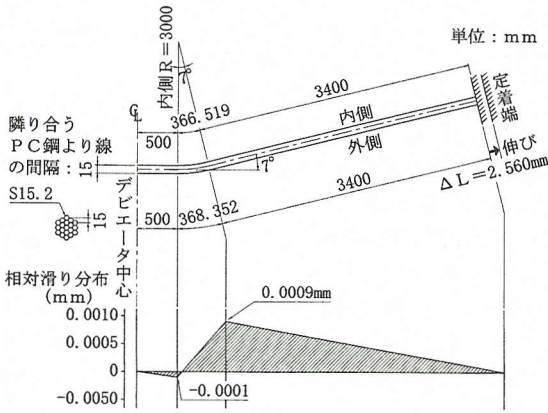


図-16 相対滑り量の分布

振幅は、試験体M-1が $0.3^\circ$ 、M-4が $0.06^\circ$ である。このため振幅サイクル内で、円弧端では外ケーブルの配置形状が直線から円弧に変化する部分があり、そこでは曲げ疲労の影響も加わり、疲労条件が苛酷になる。ただしこの変化部は軸方向長さで示すとM-1で16mm、M-4で3mmであり、この変化部以外でも破断箇所が多く存在している。よってPC鋼より線がフレットング疲労によって破断する寿命の範囲では、曲げ疲労の影響はそれほど支配的なものではないと考えられる。

d) 相対滑り

図-16に示したように、応力振幅が $120\text{N}/\text{mm}^2$ のとき、配置区間の摩擦損失を無視した場合における隣り合うPC鋼より線の相対滑り計算値は、最大でもわずか $0.0009\text{mm}$ である。実際には摩擦があるのでこれよりさらに小さくなる。このような微小な滑り量であっても、フレットング疲労が生じることを示すものである。

文献16)では、鋼を互いに接触面圧 $4\text{N}/\text{mm}^2$ で接触させ、平均応力 $200\text{N}/\text{mm}^2$ として繰返し回数 $N=5 \times 10^5$ 、 $2 \times 10^7$ において疲労強度と相対滑りの関係を求めた試験結果を示している。そこでは疲労強度は相対滑り量が増大するに従って低下するが、 $0.008\text{mm}$ 以上ではほぼ一定になる結果が示されている。筆者らの実施した疲労試験は、相対滑り量がこれより小さい量であるので、疲労強度が相対滑り量の影響を受ける領域における試験であったと考えられる。

e) 引張試験

疲労試験後解体したPC鋼より線から、未破断のPC鋼より線について静的引張試験を行った。その結果、自由長部のPC鋼より線は全て健全な母材と同等の引張強度を示し、引張強度の低下はなかった。

一方、M-1、M-2、M-3、M-5におけるデビエータ部のPC鋼より線では、引張強度より低い荷重で破断するものが

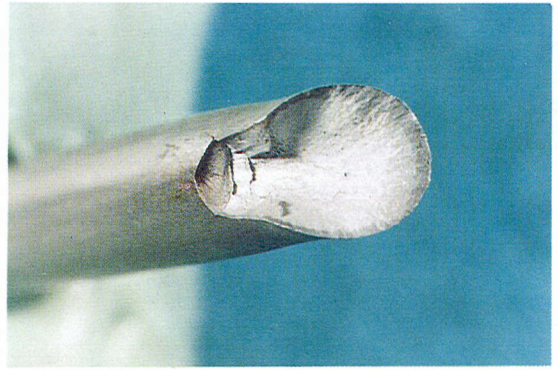


写真-5 引張試験における疲労亀裂を起点とした破断面

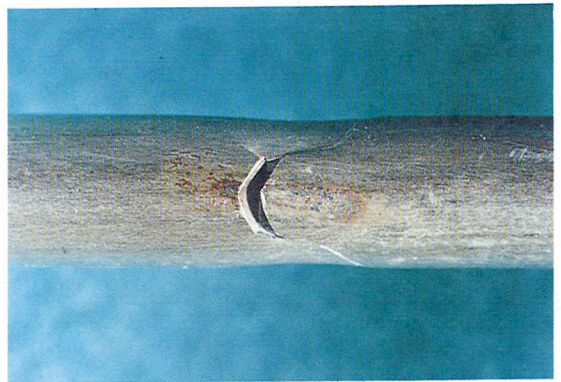


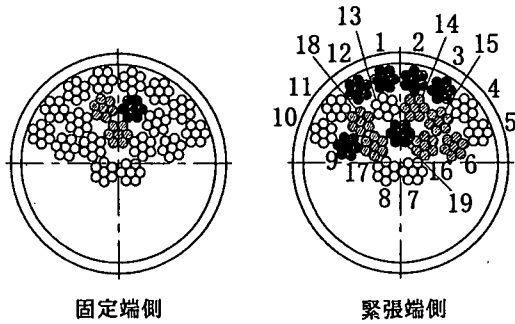
写真-6 突き合わせて撮影した素線

あった。その性状は健全なPC鋼より線を引張試験したときに見られる「絞り破断（延性破断）」と異なり、写真-5に示すように疲労特有の素線軸直角方向の亀裂を起点とした破断であった。引張試験後にそのような破断形態であった素線を突き合わせて撮影したものを、写真-6に示す。そのフレットング痕の素線軸方向における長さは4mmであったが、亀裂の発生箇所はフレットング痕の端部ではなく、中程に生じていた。

このように偏向部におけるPC鋼より線には、目視はしにくい疲労試験を続行していれば破断に至るような亀裂が生じたものがあった。よって、一部のPC鋼より線の破断が発生した段階で、他のPC鋼より線の素線にも亀裂等が生じている可能性が高い。これより曲げ半径を小さく配置したPC鋼より線の疲労寿命は、緊張材として要求される性能の保証ということを考慮した場合、初期の破断である2%破断や5%破断とするのが妥当と思われる。

また引張試験による以上のような破断性状や亀裂のある素線が散見されたことを踏まえて、繰返し载荷中のフレットング疲労による破面の進展は、以下のように類







 : 繰返し載荷中に破断したP C鋼より線  
 : 引張試験で強度低下を示したP C鋼より線

図-17 試験体M-5の断面における破断及び強度の低下した鋼より線の分布

推される。

フレット疲労による素線の亀裂は、発生後徐々に進展する。素線において亀裂が進展すると、引張力を負担する断面が減少するが、素線の残存断面が引張力を負担しきれなくなったとき、破断する。そのとき生じるのが斜めの引張破面であり、この破面は疲労試験中において瞬時に発生する。

f) 腹圧力の影響

図-17にグラウト非充填試験体M-5に関して、繰返し載荷中に破断した素線を黒塗りで示す。また疲労試験で破断しなかったP C鋼より線について、疲労試験後にP C鋼より線1本毎に引張試験を行った結果における破断荷重及び伸びに関して、健全なP C鋼より線における値より顕著に劣るP C鋼より線（破断荷重が規格値の95%以下かつ伸びが5%未満）を斜線を施して示した。これらのP C鋼より線の破断面には、いずれも繰返し載荷中に生じていたと推察される亀裂の存在が認められた。

偏向部の円弧内側の接触点ほど、外側のP C鋼より線の緊張力に伴う腹圧力が累加され、腹圧力が大きくなるとも考えられるが、各P C鋼より線の接触点の数、接触力の方向は一樣ではないので、腹圧力の状況はそれほど単純ではない。試験体M-5では内側のP C鋼より線がより多く疲労破断しているが、他の試験体では必ずしもそのような傾向は見られない。

g) 非破断の試験結果

試験体M-4( $\sigma_r = 20N/mm^2$ )では、1000万回の繰返し載荷中のP C鋼より線の破断は皆無であった。

解体して取り出したデビエータ部のP C鋼より線の全数について引張試験を行ったところ、全て健全な母材と同等の引張強度を有して絞り破断した。即ちフレット疲労による亀裂や強度劣化は生じていなかった。これより、グラウトが充填された19S15.2では、応力振幅

が $20N/mm^2$ の場合、十分な疲労寿命を有していることを確認した。

(3) グラウトの影響

a) 疲労寿命

外ケーブルにおけるP C鋼材の、安価で一般的な防錆として、保護管内部にセメントグラウトを充填する方法が採られている。グラウトがP C鋼材のフレット疲労性状にどのような影響を与えるかを把握するため、グラウトを充填した試験体M-3と同一の載荷条件（応力振幅： $50N/mm^2$ ，振動数： $0.7Hz$ ）で実施したグラウト非充填の試験体M-5の疲労試験結果を対比する。その結果、疲労寿命は表-7に示す通り、グラウト充填試験体はグラウト非充填試験体に比べて、寿命（初破断及び2%破断）が1.7倍も長いものであった。

これより保護管内にグラウトが密実に充填されていることは、P C鋼より線のフレット疲労の発生を緩和する作用があると推察される。

b) グラウトのひび割れ状況

保護管内に充填したセメントグラウトの強度試験結果を表-9に示す。P C鋼より線とグラウトの付着が良好で、両者に同一のひずみが生じると仮定した場合、例えばP C鋼より線に $20N/mm^2$ の応力変動を与えたときのグラウトに生じる応力変動は、材料非線形性を無視した計算では式(4)より $2.6N/mm^2$ になる。

$$\begin{aligned}
 \Delta \sigma_{gr} &= \Delta \sigma_r \times E_g / E_p & (4) \\
 &= 20 \times 2.5 \times 10^4 / 1.94 \times 10^5 \\
 &= 2.6N/mm^2
 \end{aligned}$$

ここに、 $E_g$  : グラウトのヤング係数 ( $N/mm^2$ )  
 $E_p$  : P C鋼より線のヤング係数 ( $N/mm^2$ )

繰返し載荷開始日におけるグラウトの引張強度は、表-9に示すように平均 $2.0N/mm^2$ であるが、上記はこれを超過するのでひび割れが生じる。

図-18に、試験体M-3, M-4, M-6のデビエータ部ケーブルにおけるグラウトひび割れ状況の下面からの描写を、表-10にひび割れ幅を示す。これは各試験体の繰返し載荷終了後、次の要領で観察、測定したものである。P C鋼より線の引張応力度を振幅最小時 ( $0.6f_{pu}$ ) に保ち、保護管を剥ぎグラウトを露出させ、ひび割れの発生位置、間隔、幅等を観察した。その後応力度が振幅最大時 ( $0.6f_{pu} + \Delta \sigma_r$ ) になるようにアクチュエータにより載荷ブロックに鉛直変位を与えて、ひび割れ幅を測った。

試験体M-4, M-6ではケーブル軸に対して直角方向のひび割れ幅は、 $0.04mm$ で軽微であった。ただし振幅サイクル内で配置形状が直線から円弧に変化するデビエータ内

表-9 グラウトの強度試験結果

単位：N/mm<sup>2</sup>

試験体 No.	繰返し載荷開始日		28日	
	圧縮	引張	圧縮	引張
M-1	26.4	1.8	35.6	2.8
M-2	33.9	2.1	43.1	2.6
M-3	28.8	2.0	35.8	2.7
M-4	34.4	2.0	39.0	2.9
M-6	25.5	2.1	36.3	2.2
平均	29.8	2.0	38.0	2.6

表-10 グラウトのひび割れ幅

単位：mm

試験体 No.	応力振幅 N/mm <sup>2</sup>	デビエータ部		自由長部	
		直角方向	軸方向	直角方向	軸方向
M-3	50	0.06	0.15	0.04	0.04
		?	?	?	?
		0.20	1.2	0.10	0.15
M-4	20	0.04, 円弧端で 0.15	なし	0.04	0.15
		0.04, 円弧端で 0.15	なし	0.04	?
M-6	50	0.04, 円弧端で 0.15	なし	0.04	?
		0.04, 円弧端で 0.15	なし	0.04	0.20

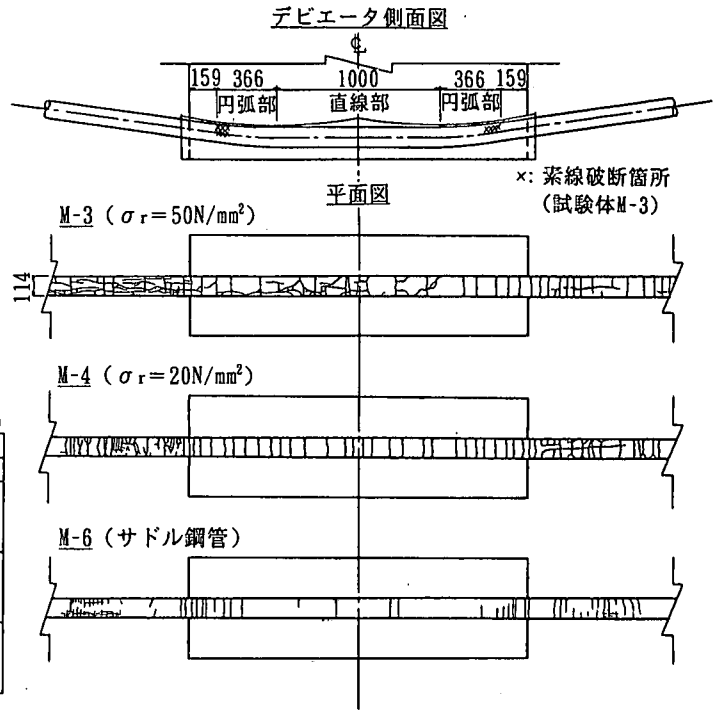


図-18 グラウトのひび割れ状況

の円弧端では、0.15mmであった。

試験体M-3のデビエータ部は、直角方向のひび割れ幅が0.06～0.20mm、ひび割れ間隔が50～200mmであり、グラウト調査を行った中で、ひび割れ程度の最も大きな試験体であった。軸方向ひび割れは、P C鋼より線の素線の破断による衝撃が入ったひび割れと推察される。

M-3、M-4、M-6のうち、疲労試験の繰返し載荷中に素線の破断が生じた試験体はM-3であった(表-7参照)。これよりグラウトに、部材軸に対し直角方向にひび割れが多く入っている試験体では、P C鋼より線のフレットング疲労寿命が短いという関連性が見出せる。これはグラウトがひび割れた場合、P C鋼より線相互の相対滑りが生じ易くなり、フレットング疲労が促進されるためと考えられる。

(4) 主塔サドル構造のフレットング疲労特性

a) 耐疲労性

エクストラドーズドP C橋の主塔サドルをモデル化した試験体M-6では、P C鋼より線に与えた応力振幅を50 N/mm<sup>2</sup>として300万回の疲労試験を行った。

その結果、P C鋼より線に破断は生じず、疲労に対し健全であることが確認された。このように疲労寿命が延伸された要因としては、以下が考えられる。

①鋼管による応力負担

繰返し載荷終了後に、鋼管下面を剥ぎ取り、グラウトをはつり露出させたP C鋼より線にゲージを貼付し、応

力振幅を計測した。図-15に計測した応力振幅分布を示すが、サドル中心に近づくほど応力振幅が低減されている。これは円弧配置部での摩擦の他に、P C鋼より線に与えられた応力振幅が、サドル鋼管内ではグラウトとの付着を介して鋼管に一部が伝達されることも要因であると考えられる。鋼管下面を剥ぎ取ったことによるグラウトとの一体性が損なわれた条件での計測であることを考慮すると、繰返し載荷中はさらにP C鋼より線の応力振幅は低減されていたものと推察される。

これを裏付けるものとして、サドル鋼管の端面より140mm離れた位置の周面4ヶ所に貼付したゲージにより、繰返し載荷時に鋼管の軸方向成分として18N/mm<sup>2</sup>の応力振幅が生じていることを計測した。これよりサドル部では鋼管も応力負担していることを確認した。そのため本構造では、P C鋼より線の応力振幅が軽減されていたことが分かる。

②鋼管及びスペーサによるグラウトの拘束効果

図-18、表-10に示した鋼管内のグラウトのひび割れ状況より、M-6をM-4と対比した場合、応力振幅が大きいにも関わらずひび割れ数が少なく、かつひび割れ幅は同程度であった。これはサドル鋼管及びスペーサによるグラウトの拘束効果が発揮されているためと推察される。これによりP C鋼より線相互の相対滑りが緩和されている。

③スペーシング効果

サドル鋼管出口では、ポリエチレンスペーサを配置し

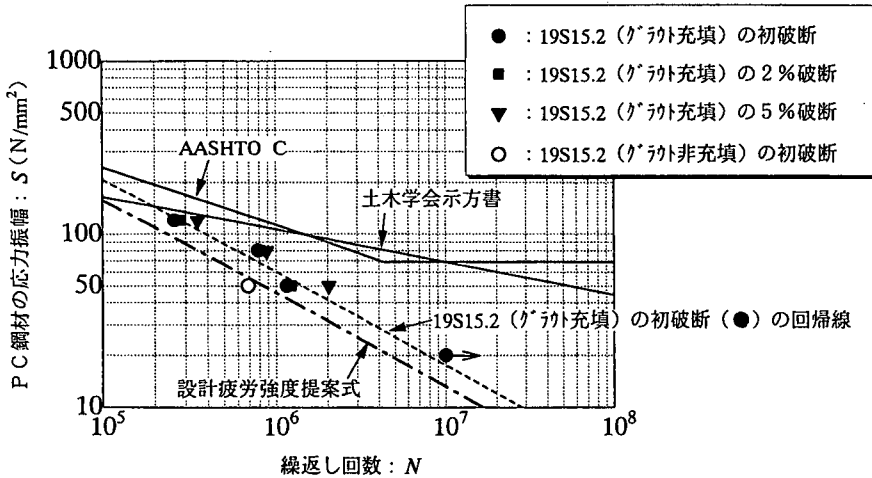


図-19 PC鋼より線19S15.2のフレットング疲労試験によるS-N線図

表-11 19S15.2 (グラウト充填) の  
初破断に関する回帰線

y 軸切片	勾配	相関係数
$\alpha$	k	r
4.999	0.536	0.95

ており、PC鋼より線相互は接触しないように間隔が離されている。これにより、円弧配置部における自由長側の端部にPC鋼より線相互が接触しない区間が設定されている。そのためフレットング疲労破断が生じなかったと考えられる。

これらにより本構造は、PC鋼より線のフレットング疲労の抑制に有効であると考えられる。

#### b) 鋼管接触によるフレットング痕の性状

本試験体を疲労試験後に解体し、フレットング痕を外観調査した。フレットング痕のPC鋼より線軸方向における長さは、PC鋼より線相互のフレットング痕が2~6mm、PC鋼より線と鋼管とのフレットング痕は5~20mmであった。フレットング摩耗粉による赤錆の発生は、PC鋼より線と鋼管とのフレットング痕回りの方が多く見られた。

PC鋼より線と鋼管とのフレットングでは、痕の大きさから分かるように接触面積が比較的大きい。そのため腹圧力による支圧応力度が小さくなるので、フレットング疲労の条件はPC鋼より線相互の場合より緩和されているものと推察される。

## 4. 大容量PC鋼より線のS-N線図

### (1) S-N 回帰線

19S15.2の試験体M-1, 2, 3, 4, 5の疲労試験結果である

疲労寿命(破断時繰返し回数)を図-19にプロットした。繰返し載荷終了時において破断していないものについては、→で示した。

グラウトを充填した19S15.2の試験体M-1, 2, 3の初破断について、 $\log S$ の $\log N$ に対する回帰直線を同図に示す。回帰式(1)のy軸切片、勾配、相関係数を表-11に示す。

19S15.2と2S15.2の疲労試験は、偏向部におけるPC鋼より線の重なり段数やグラウト充填の有無等の条件が異なる試験であったが、得られた回帰直線の勾配は互いに近いものであった。

### (2) テキサス大学の疲労試験結果との比較

PC鋼材のフレットング疲労に着目した疲労試験として、J.E.Breenら(テキサス大学, VSL International)が行った実績がある。<sup>12) 17)</sup> 文献12)の試験体の仕様は、緊張材がPC鋼より線12S12.7、保護管は亜鉛メッキ鋼管(内径75mm)、充填材はセメントグラウトである。試験体ケーブルに応力振幅を与える方法は筆者らと同じく、ケーブルを偏向させたデビエータブロックを油圧装置により変位振幅させることによるものである。試験体であるPC鋼より線には170N/mm<sup>2</sup>の応力振幅が与えられた。デビエータでは、PC鋼より線を滑らかに正しく配置したものの(曲げ半径約3m)と端部に2種類の折れ角を与えたものの3体が実施された。J.E.Breenらは、その結果を踏まえて、内ケーブルまたは外ケーブルポストテンション方式コンクリート桁の疲労設計は、アメリカの幹線道路及び運輸機関の協会であるAASHTO<sup>18)</sup>の"Redundant Load Path Structures"に適用するC部門曲線(図-19参照)に従うことを推奨した。ここにAASHTOのS-N線は、鋼橋設計用に鋼製部材の表面の平滑性

やフランジ寸法・溶接状況に応じて等級分類されて提示されており、その等級はAからFまで設定され、そのうち疲労強度に関してはAが最も高く、Fが最も低いものである。

またJ.E.Breenらの実施した疲労試験における滑らかな配置をした試験体の初破断は、470,380回であったと報告されている。

筆者らの行った大容量PC鋼より線の疲労試験では、初破断470,000回に相当する疲労強度は、 $S-N$ 回帰線より $90\text{N/mm}^2$ であり、筆者らの試験による疲労強度の方が低い。両者の試験条件の相違点は、次のふたつが挙げられる。

① J.E.Breenらの試験体は、12S12.7であるのに対し、筆者らの試験体は19S15.2である。19S15.2の方がPC鋼より線本数が多いので、偏向部では重なる段数が多く、その分腹圧力が増すことになり、フレット疲労に寄与する条件が厳しい。

② J.E.Breenらの試験における試験体ケーブルに与えた下限応力は、疲労試験振幅における油圧装置の最小荷重値から推定するに、筆者らの試験の下限応力（引張強度の60%）より低いようである。そのため筆者らの実施した疲労試験より寿命が延びた結果が生じていると推察される。

J.E.Breenらの試験による疲労強度と筆者らの試験による疲労強度の差異は、これらが原因しているものと推察される。

## 5. 大容量PC鋼より線の設計疲労強度式の提案

図-19より分かるように、土木学会コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に示されているPC鋼より線の設計疲労強度式を曲げ配置半径の小さなPC鋼より線に適用することは、危険側になる。よって当該PC鋼より線のフレット疲労を考慮した設計疲労強度式として、式(5)を提案する。式(5)は大容量PC鋼より線19S15.2の試験体の初破断の疲労寿命より、試験値が下回る確率を5%として得られた式である。具体的には、当該試験結果の回帰線に対し、 $S$ 軸方向に関して標準誤差<sup>19)</sup>の2倍を下げ得た式である。

$$f_{prd} = \frac{10^\alpha}{N^k} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (5)$$

ここに、 $\alpha = 4.9$ 、 $k = 0.54$

本式を提案するために用いたPC鋼より線の疲労試験の方法及び試験体の条件を以下にまとめる。

方法：デビエータブロック（偏向角 $14^\circ$ ）を、ケーブル試験体の配置方向とは直交する方向に一定変位振幅を与えることにより、PC鋼より線に軸方向ひずみ変動を生じさせて応力振幅を与えた。

条件：(1) PC鋼より線は、19S15.2B。

(2) 下限応力度は、引張強度の0.6倍。

(3) 曲げ配置半径は、3.0m。

(4) 保護管内にグラウトが充填されている。

## 6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) PC鋼より線2S15.2、19S15.2の疲労試験において半径3.0mの曲げ配置部で、破断を確認した。素線の破断起点にはフレット痕と亀裂が観察された。これはPC鋼より線相互の点接触による高圧支の環境と、応力振幅に伴う微小な相対滑りの生じる環境が相まったフレットにより疲労損傷が生じ、それが主原因となってPC鋼より線の素線が破断に至ったものである。
- (2) 素線の破断起点は、PC鋼より線相互のフレットによって発生したものがほとんどであったが、一部にPC鋼より線を構成する素線相互のフレットによって発生したものも見られた。ただしフレットによる疲労寿命は、PC鋼より線相互の場合の方が素線相互の場合より短い。
- (3) PC鋼より線について、空気中のフレットの発生が無視される環境での疲労強度に比べ、フレットが伴った場合のそれは、低強度であることを確認した。これより、外ケーブルのような曲げ半径を小さく配置したPC鋼より線の疲労設計では、フレットによる疲労強度低下を考慮することが必要であると考えられる。
- (4) 曲げ配置半径の小さい大容量PC鋼より線に関するフレット疲労を考慮した設計疲労強度式(5)を提案する。
- (5) 曲げ配置半径3.0mによる偏向部を有し、保護管内にグラウトを充填した19S15.2について、応力振幅 $20\text{N/mm}^2$ の1000万回の繰返し載荷を行った結果、PC鋼より線にフレット疲労による破断は生じず、機械的性能の劣化も全く生じなかった。よって当該仕様におけるPC鋼より線は、応力振幅 $20\text{N/mm}^2$ の場合、1000万回以上の疲労寿命を有していることを確認した。
- (6) 保護管内にセメントグラウトを充填した試験体は、充填していない試験体に比べて疲労寿命が1.7倍に延びた結果が得られた。これよりグラウトには、PC



鋼材のフレッチングを抑制する、例えば相対滑りを拘束するような作用があると推察される。

- (7) サドルにおける鋼製保護管の端部内面にテーパを設け、端面にポリエチレンスペーサを密着配置することによって内部グラウトを拘束した構造は、PC鋼より線のフレッチング疲労の抑制に有効であることを確認した。
- (8) エポキシ樹脂塗装PC鋼より線は、通常の裸PC鋼より線に比較して耐フレッチング疲労性能が優れている結果が得られた。

謝辞：本研究を遂行するに際し、角田典史雄教授（北海道大学）、山崎淳教授（日本大学）には有益なる御助言を賜りました。また疲労試験を実施するにあたり、富士化工(株)殿に御協力を頂きました。ここに厚く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 例えば、R.B.Waterhouse(佐藤準一訳)：フレッチング損傷とその防止法、養賢堂、pp.3, 1984.
- 2) 梅津健司、藤田学、新井英雄、上田多門：外ケーブル偏向部のフレッチング疲労特性に関する研究、プレストレストコンクリート技術協会第6回シンポジウム論文集、pp.281-286, 1996.10.
- 3) 梅津健司、藤田学、新井英雄、上田多門、鮎子多浩一：外ケーブル偏向部におけるPCストランドのフレッチング疲労性状の研究、鋼構造論文集、Vol.5, No.17, pp.57-66, 1998.3.
- 4) 関護雄、山元茂、新保起夫：PC鋼索線の引張強度、材料、Vol.18, 第190号、pp.595-598, 1969.7.
- 5) 後藤祐司、猪熊康夫：ひびわれを有するPC桁中のPC鋼材の疲労特性について、プレストレストコンクリート技術協会誌、Vol.26, No.6, pp.83-90, 1984.11.
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編、pp.35-36, 1996.3.
- 7) 豊福俊泰、米田利博：PC鋼より線の疲労強度、コンクリート工学、Vol.25, No.7, pp.37-40, 1987.7.
- 8) 小林佑規、田中義久：7本よりプレストレッシングストランドの空気中疲労強度および3%NaCl中腐食疲労強度、プレストレストコンクリート技術協会誌、Vol.31, No.2, pp.7-15, 1989.3.
- 9) 土木学会：コンクリート技術シリーズ22RC・PC構造物の設計に関する現状と今後の展望、pp.66, 1997.8.
- 10) (財)高速道路調査会：PC橋の新しい構造事例に関する研究報告書(外ケーブルの有用性と適用に関する調査検討)、pp.30, 1993.3.
- 11) 猪股俊司：プレストレストコンクリートの設計・施工、技報堂出版、pp.40, 1979.4.
- 12) Gregor P.Wollmann, Karen Ryals, John E.Breen and Michael E.Kreger：Fretting Fatigue of External Tendons in Segmental Bridge Deviators, *Workshop - Behaviour of External Prestressing in Structures*, AFPC, pp.131-140, June. 1993.
- 13) 菊地稔、三原英之、石井精一、立花勝利：蟹沢大橋の設計と施工、プレストレストコンクリート技術協会誌、Vol.39, No.2, pp.59-65, 1997.11.
- 14) Post-Tensioning Institute Committee on Cable-Stayed Bridges：Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation, pp.21-22, August. 1993.
- 15) 武藤睦治：フレッチング疲労の破壊機構、材料、Vol.46, No.11, pp.1233-1241, 1997.11.
- 16) 河本実：機械工学大系7 金属の疲れと設計、コロナ社、pp.226-227, 1972.
- 17) Gregor P.Wollmann, David L.Yates, John E.Breen and Michael E.Kreger：Fretting Fatigue in Post-Tensioned Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.2, pp.172-179, March. 1996.
- 18) American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc.：Standard Specifications for Highway Bridges, Fourteenth Edition, pp.112-117, 1989.
- 19) 池田央：統計的方法 I, pp.100-112, 新曜社, 1976.

(1998.11.27 受付)

## FRETTING FATIGUE CHARACTERISTICS IN THE CURVED LAYOUT OF LARGE-CAPACITY PRESTRESSING STRANDS

Hideo ARAI, Manabu FUJITA, Kenji UMEZU, Hirokazu FUSHITA  
and Tamon UEDA

Fatigue tests were carried out on the fretting of prestressing strands S15.2 given a small radius of curvature, in external tendons of a prestressed concrete bridge. It was confirmed that the fretting associated with high bearing stress and relative slipping at the contact points between prestressing strands causes the ruptures of strands, and fretting mark and crack were found at the point of origin of rupture. It was learned that the lifetime under these conditions is shorter than the usual fatigue lifetime in which fretting effects are negligible. From the test results, we propose a design fatigue strength formula of prestressing strands that takes fretting in small radius of curvature into account and show that a cable grouted with cement mortar is effective in suppressing fretting fatigue.